

論文 鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究

河村 圭亮^{*1}・中村 光^{*2}・国枝 稔^{*3}・上田 尚史^{*4}

要旨: 本研究では、鉄筋腐食により鉄筋軸方向に沿ったひび割れおよび横方向のひび割れが生じるケースを対象として、ひび割れ進展挙動のメカニズムを検討した。まず、電食実験を行い、腐食量と表面ひび割れ幅の拡大挙動ならびに断面内のひび割れ進展挙動を調べた。次に、3次元RBSMを用い、腐食膨張によるひび割れ進展解析を行った。実験、解析の両面から、鉄筋軸方向に沿ったマクロなひび割れはかぶり面側から生じ、鉄筋位置に向かって進展していくことを示した。また、横方向に進展するひび割れが表面ひび割れ幅の拡大挙動に影響を及ぼすことを示した。

キーワード: 鉄筋腐食, ひび割れ進展, 電食実験, 剛体バネモデル

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化事例が数多く報告されており、コンクリート構造物の長寿命化をはかるためにも維持管理の重要性は益々大きくなっている。コンクリート構造物の早期劣化の要因の1つに鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋の腐食膨張圧により生じるひび割れの進展は、コンクリート片の剥落を招き、美観上の問題や第三者被害を引き起こす可能性があり、維持管理上の重要なポイントとなる。また、劣化した構造物の補修計画を立てる際には、表面の劣化状況から内部の損傷を予測する必要がある。そのため、測定可能な表面ひび割れ幅から鉄筋の腐食量および内部のひび割れ進展挙動を定量的に評価する予測技術の確立が望まれている。

鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展に関しては、かぶり厚や鉄筋径の違いによるひび割れの発生パターン¹⁾は明らかになりつつある。しかしながら、表面ひび割れ幅の進展挙動について検討した例²⁾は少なく、また、内部ひび割れ進展挙動については、解析的に2次元の離散ひび割れモデルを用いて検討^{3),4)}はされているが、まだ明確にはなっていない。

そこで本研究では図-1に示すような鉄筋軸に沿ったひび割れ(以下軸方向ひび割れ)および横方向へのひび割れ(以下横方向ひび割れ)が生じるケース¹⁾を対象と

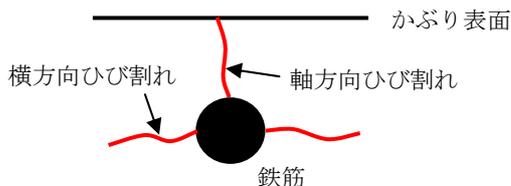


図-1 対象とするひび割れパターン

して、電食実験を行い、腐食量と表面ひび割れ幅およびひび割れ進展挙動の関係について調べた。なお、実験では実構造物を対象とするため異形鉄筋を使用した。さらに、3次元剛体バネモデル(以下RBSM)を用いて、腐食膨張によるひび割れ進展解析を行い、実験、解析の両面からひび割れ進展挙動のメカニズムを検討した。

2. 電食実験による腐食に伴うひび割れ進展挙動評価

2.1 実験概要

実験供試体は図-2に示すような断面150×150mm、長さ300mmの角柱供試体であり、かぶり厚30mmで、長さ250mmの異形鉄筋D19が1本埋設されている。実験に用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。通電は材齢32日から開始し、その時点におけるコンクリートの圧縮強度は18.5(MPa)、引張強度は1.8(MPa)であった。

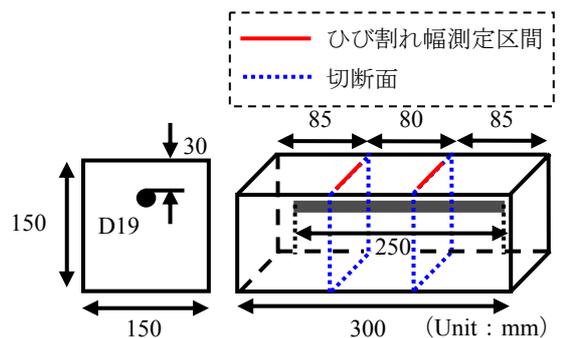


図-2 実験供試体概要

表-1 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
56.5	44.5	160	284	801	1017	2.84

- *1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (正会員)
- *2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)
- *3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工) (正会員)
- *4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 修士(工) (正会員)

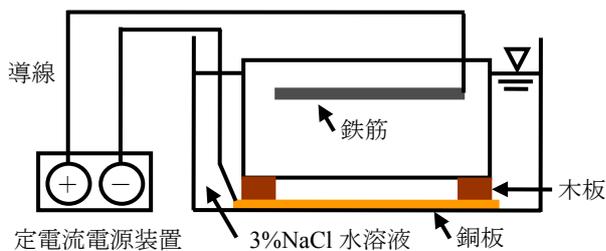


図-3 電食実験概要

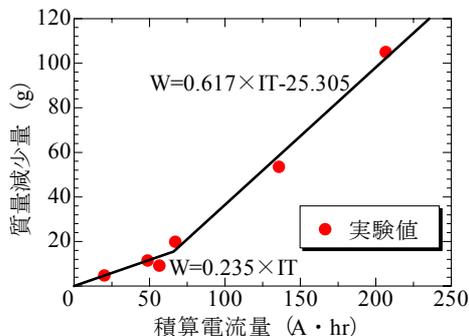


図-4 積算電流量と質量減少率の関係

電食実験装置の概要を図-3に示す。電解液には3%塩化ナトリウム水溶液を用い、鉄筋側をアノード極、銅板側をカソード極に接続した。実験は、定電流電源装置により電流密度 $0.9\text{mA}/\text{cm}^2$ の電流を通電させ、腐食量をパラメータとするため、通電時間を変化させて6ケース(各1体)行った。

図-2に示すようにかぶり表面の2ヶ所で検長100mmのπ型変位計を用いてひび割れ幅の経時変化を測定した。また、通電終了後、ひび割れ幅の測定を行った地点において、コンクリートカッターを用いて供試体を切断し、断面内のひび割れ進展挙動を観察した。さらに、鉄筋をはつり出し10%クエン酸アンモニウム水溶液に約24時間浸漬させて腐食生成物を除去した後、質量の測定を行い、質量減少率を算出した。

2.2 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

各ケースの通電終了後における質量減少率は、それぞれ0.9%、1.7%、2.1%、3.6%、10.0%、19.3%であった。図-4に示すように、積算電流量と質量減少量の関係は式(1)に示すような2直線で近似される傾向が見られた。

$$\begin{aligned} W &= 0.235 \times IT & (IT < 66) \\ W &= 0.617 \times IT - 25.305 & (IT > 66) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、Wは腐食量(g)、ITは積算電流量(A·hr)である。勾配が変化する時点は、表面ひび割れが発生する時点とほぼ一致しており、酸素の透過性が向上したために反応速度が向上したと考えられる。

式(1)のように質量減少量が増加するにしたときの、単位表面積あたりの腐食量と表面ひび割れ幅の関係を図-5に示す。図中の表面ひび割れ幅は、測定した2地点での差が小さかったため平均値で示している。

すべてのケースにおいて腐食量約 $60\text{mg}/\text{cm}^2$ の時点で

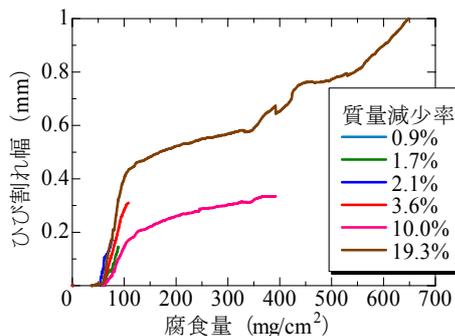


図-5 腐食量と表面ひび割れ幅の関係

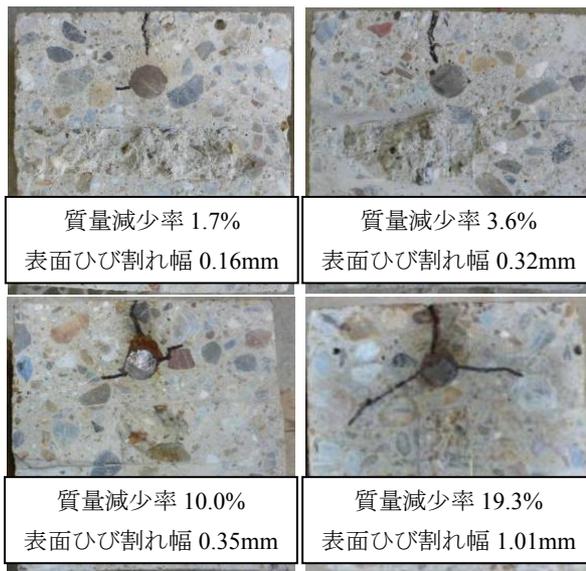


写真-1 断面内のひび割れ進展挙動

かぶり表面にひび割れが生じている。この時点の腐食量は既往の研究²⁾と比較すると大きい。本実験ではかぶり面が気中にあることなどが1つの原因として推測され、詳細については今後検討が必要と考えられる。その後、腐食量約 $100\text{mg}/\text{cm}^2$ までに表面ひび割れ幅が0.2~0.4mmに拡大する。その後はひび割れ幅の変化が小さくなっている。質量減少率19.3%の結果を見ると、腐食量が約 $350\text{mg}/\text{cm}^2$ の時点で再び勾配が大きくなる傾向が見られた。このようにひび割れ幅の変化は、勾配が変わる地点が腐食量約 $100\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $400\text{mg}/\text{cm}^2$ の2ヶ所あり、3つの勾配に分けられる傾向を示した。ここで、それぞれの勾配を順に1次勾配、2次勾配、3次勾配と定義する。

2.3 鉄筋腐食によるひび割れ進展挙動

質量減少率1.7%、3.6%、10.0%、19.3%の時点での切断面におけるひび割れ進展状況をそれぞれ写真-1に示す。写真中の黒線は目視で観察できたひび割れを示しており、ひび割れ幅約0.1mm以上のものと推定される。表面にひび割れが生じた後の質量減少率1.7%、3.6%のケースを見ると、軸方向ひび割れがかぶり面側から生じ、鉄筋位置に向かって進展していく挙動が確認できる。なお、

質量減少率 3.6%のケースでは鉄筋近傍からかぶり面に向かって、ひび割れ幅が大きくなっていることを確認している。その後の質量減少率 10.0%, 19.3%のケースを見ると、横方向ひび割れが発生し、腐食の進行に伴って進展していく挙動が確認できる。これらの挙動については 3.4 節で解析結果と併せてそのメカニズムについて考察を行う。

3. 腐食に伴うひび割れ進展挙動の解析的評価

3.1 解析手法

(1) 3次元 RBSM

本研究では、構造解析手法に離散型の解析手法であり、ひび割れの発生・進展挙動を直接表現可能な RBSM⁵⁾を用いた。RBSM では、ひび割れを要素間のバネの破壊として表現するため、ひび割れは要素境界辺上に沿って発生する。そのため、ひび割れの発生および進展挙動の要素形状依存性を低減するために Voronoi 多角形分割⁶⁾を用いてコンクリートをランダムな要素に分割した。図-6 に示すように、各要素の重心に 6 自由度の 3 次元剛体変位を設定した。要素境界面上は、境界面重心および境界面頂点からなる三角形に分割し、それぞれの三角形の重心に表面力の評価点としての積分点を設けた。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、圧縮・引張挙動を表現する垂直バネ (1 個) およびせん断すべり挙動を表現するせん断バネ (2 個) を配置した。このように、1 つの要素境界面上に複数のバネ系を配置することで、回転バネを導入することなく、隣接する要素間の曲げモーメントおよびねじりモーメントの伝達を評価している⁷⁾。

(2) 材料モデル

コンクリートの材料モデルは、垂直バネについては、圧縮領域では圧縮強度までは 2 次曲線とし、その後は破壊エネルギーを考慮して直線的に軟化するモデルを用

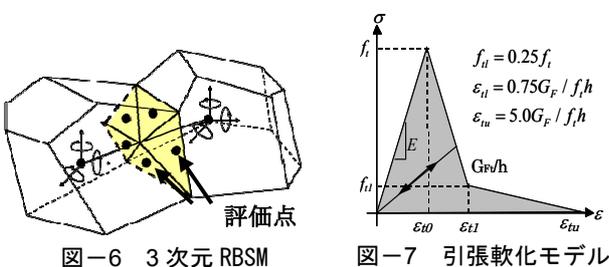


図-6 3次元 RBSM

図-7 引張軟化モデル

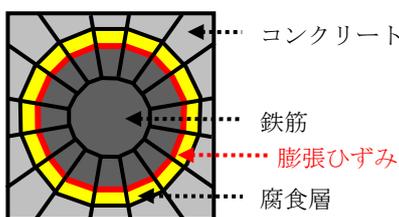


図-8 腐食層のモデル

いた。引張領域では図-7に示すように、引張強度以降の軟化域に引張破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを用いた。また、除荷経路は原点指向型の線形除荷モデルとした。せん断バネについては、モール・クーロン型の破壊基準⁸⁾を用いて、降伏後は関連流れ則に従い、終局せん断ひずみに達するまで降伏曲面上を移動するものとして、コンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。また、ひび割れ開口に伴うせん断伝達特性の劣化を表現するために、ひび割れ幅に対してせん断剛性を低減させた。

本解析では、かぶり面側を比較的小さな寸法の要素となるように Voronoi 分割を行っており、最小要素寸法は 5mm である。そのため、各バネの構成モデルにおける材料パラメータと、材料試験より得られる材料特性値は、着目しているスケールが違うため物理的意味合いが異なることに注意する必要がある。そこで、山本らの研究⁷⁾を基に、引張強度および引張破壊エネルギーについて材料パラメータの同定を行った。

(3) 腐食膨張モデル

腐食膨張圧は、図-8 に示すように、鉄筋とコンクリートの間に腐食層をモデル化し、鉄筋と腐食層の要素境界面上に配置されている垂直バネに一樣な漸増する膨張ひずみを初期ひずみとして作用させることで、モデル化を行った⁹⁾。なお、腐食層は厚さ 1mm で一定としてモデル化している。

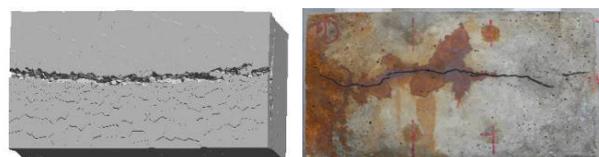
本腐食膨張モデルでは、作用させる膨張ひずみ量に応じた変位と解析より得られる変位は異なる。そこで本研究では、解析によって得られた腐食層要素の変位量が腐食量と対応すると仮定し、変位量の平均値から式(2)⁴⁾より腐食量の算定を行った。

$$W_r = \frac{\rho_s U_r}{(dV - 1)} \quad (2)$$

ここで、 W_r は鉄筋の腐食量 (mg/cm^2)、 ρ_s は鉄の密度 ($=7.85 \times 10^3 \text{mg}/\text{cm}^3$)、 U_r は腐食層要素の変位量の平均値 (mm)、 dV は錆の体積膨張率 ($=2.5$) である。

3.2 解析概要

本解析手法を用いて実験供試体を対象としたひび割れ進展解析を行った。なお、境界条件は実験における支持部をヒンジ支点としている。図-9 に本解析によって得られた変形図を示すが、実験同様にかぶり面に軸方向



(a) 解析結果 (倍率 30 倍) (b) 実験結果

(ひび割れ幅 0.35mm) (ひび割れ幅 0.31mm)

図-9 表面ひび割れ性状

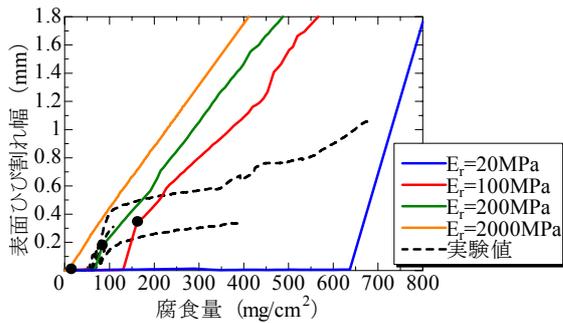


図-10 腐食層のヤング係数による影響

ひび割れが生じる挙動を再現することができている。

3.3 腐食層のヤング係数による影響

本腐食膨張モデルを用いる際には腐食層のヤング係数 E_r に注意する必要がある⁹⁾。 E_r を 20MPa, 100MPa, 200MPa, 2000MPa とした 4 ケースについて同様の解析を行ったときの、各ケースでの腐食量と表面ひび割れ幅の関係を図-10 に示す。ここで、解析における表面ひび割れ幅は実験同様にかぶり表面に配置した検長 100mm のコンクリート要素間の相対距離から計算した。すべてのケースにおいて図-9 に示すような軸方向ひび割れが生じ、内部のひび割れ進展挙動も同一であった。しかし、 E_r の違いによって、ひび割れ発生時の腐食量、勾配が変化するときの表面ひび割れ幅およびひび割れ幅の拡大する勾配が異なる結果となった。また、いずれのケースにおいてもひび割れ幅の拡大する勾配の変化は、実験と同様の傾向を定性的に評価できているが、定量的に実験値を評価することはできていない。要因としては腐食量の算定方法や、ひび割れ発生後の膨張ひずみの与え方、腐食層のヤング係数などによる影響が大きいと考えられるため、今後更なる検討が必要であると考えられる。

3.4 鉄筋腐食によるひび割れ進展挙動のメカニズム

腐食層のヤング係数によらず、ひび割れ進展挙動は同様であったため、図-10 の●印で示す 1 次勾配から 2 次勾配に移行する時点でのひび割れ幅が実験値に近い E_r が 100MPa のケースにおける解析結果および実験結果より、ひび割れ進展挙動についての考察を行う。ここで、図-7 に示す引張軟化モデルにおいて、ひずみが、応力が引張強度に達したときのひずみ ϵ_{10} を越えたとき、微細ひび割れが発生し、引張応力が消失する時のひずみ ϵ_{10} を越えたときに、マクロなひび割れが生じたと仮定する。考察は微細ひび割れが進展する段階、およびかぶり表面にマクロなひび割れが進展する段階についてそれぞれ行うこととした。

(1) 表面ひび割れ発生以前

かぶり表面にマクロなひび割れが生じる腐食量 $130\text{mg}/\text{cm}^2$ 時点より前の、微細ひび割れが進行する段階の挙動について考察を行う。図-11 に腐食量 $75\text{mg}/\text{cm}^2$, $100\text{mg}/\text{cm}^2$, $124\text{mg}/\text{cm}^2$ の時点における断面内のひび割れ

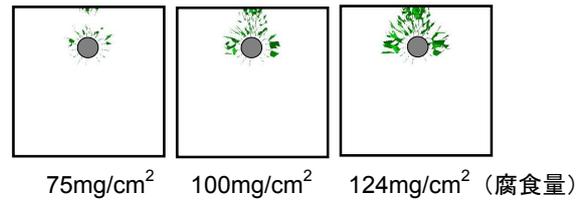


図-11 ひび割れ図

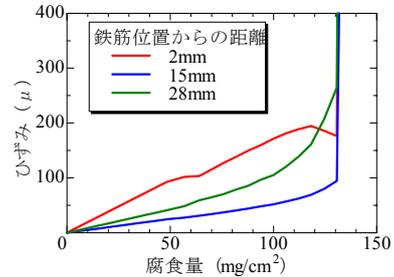


図-12 かぶりコンクリート中のひずみ変化



図-13 ひび割れ発生前の変形挙動のイメージ

図を示す。図中には鉄筋軸方向の中央付近において、応力が引張強度に達した面を緑色で示している。なお、この段階では、ひずみ値はすべて図-7 の ϵ_{10} を超えることはなかった。鉄筋位置からかぶり面側に向かって約 2mm, 15 mm, 28mm の位置において、検長約 20mm の要素間の相対距離から計算した断面内横方向のひずみの変化を図-12 に示す。ひび割れ図より、微細ひび割れは鉄筋周囲およびかぶり面側の両側から発生し、かぶりコンクリート全体に広がっていく挙動を示している。軸方向に沿ってマクロなひび割れは 1 本のみ発生するが、それ以前ではある領域を持って微細ひび割れが生じていることが分かる。この領域が破壊進行領域であると考えられる。また、ひずみの変化を見ると、鉄筋位置からの距離が 2mm, 28mm, 15mm の順に大きなひずみの値を示しており、この段階では鉄筋近傍での変形の方が卓越した図-13 に示すような挙動になると考えられる。ただし、マクロなひび割れが発生する腐食量 $130\text{mg}/\text{cm}^2$ の直前ではかぶり面側のひずみの方が大きくなっており、マクロなひび割れ発生前にはかぶり表面に損傷がより蓄積されることが示されている。

(2) 表面ひび割れ発生後

かぶり表面にマクロなひび割れが生じた後のひび割れ進展挙動について考察を行う。図-14 に内圧分布、変形図、ひび割れ図を表面ひび割れ幅の値と併せて示す。なお、内圧は腐食層とコンクリートの要素境界面上に配置された垂直バネの圧縮応力によって評価している。ひび割れ図は図-7 に示す応力-ひずみ関係で、引張応力が消失したひずみ ϵ_{10} 以上の面を赤色で示している。こ

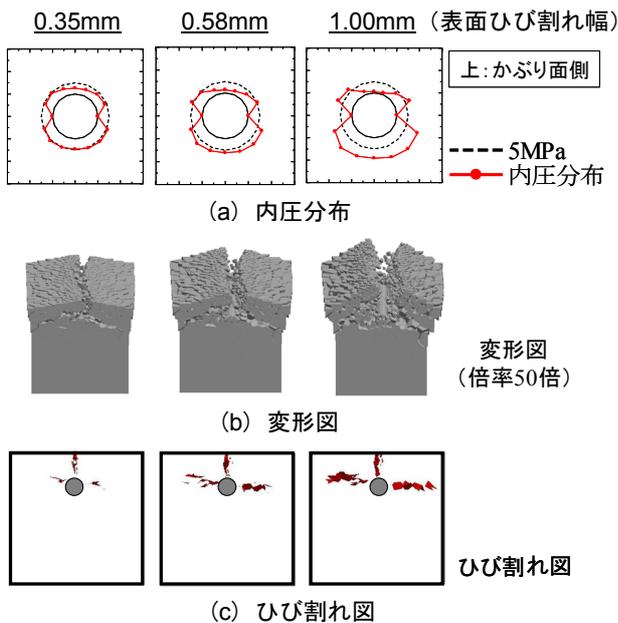


図-14 ひび割れ発生後の解析結果

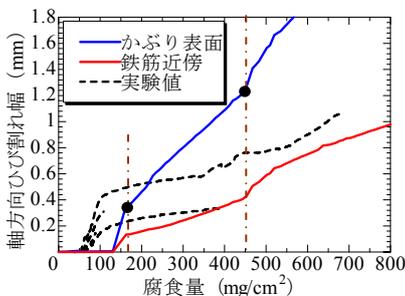


図-15 軸方向ひび割れ幅の変化

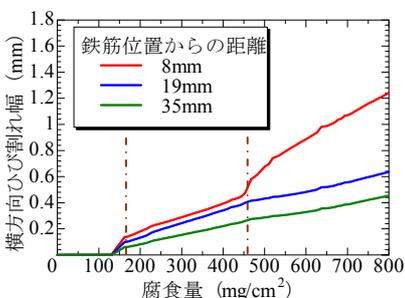


図-16 横方向ひび割れ幅の変化

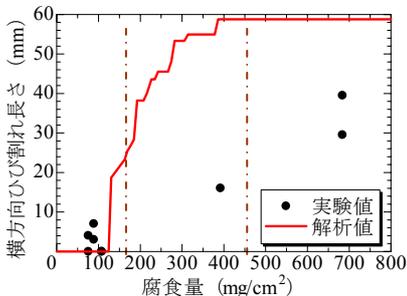


図-17 横方向ひび割れ長さの変化

の時点は今回の解析では、ひび割れ幅 0.17mm に対応する。軸方向ひび割れはかぶり面側から生じており、鉄筋位置に向かって進展していくとともに、横方向ひび割れが生じて進展していく実験同様の挙動を評価することができている。

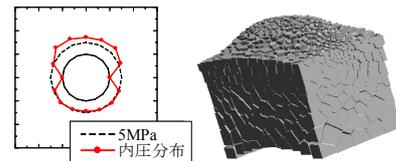


図-18 ひび割れ発生前の内圧分布および変形図

軸方向ひび割れ幅の変化について、かぶり表面および鉄筋近傍での値を併せて図-15 に示す。また、横方向ひび割れ幅の変化について鉄筋位置から 8mm, 19mm, 35mm の位置での値を図-16 に示す。さらに、横方向ひび割れの進展長さの変化を図-17 に示す。かぶり表面におけるひび割れ幅の変化は、図-15 中に●印で示した勾配が変わる地点が 2 ヶ所あり、3 つの勾配に分けられる傾向は実験結果と一致している。

ひび割れ発生後の 1 次勾配では、かぶり表面から鉄筋位置へひび割れが進展している。実験では写真-1 に示す質量減少率 1.7%, 3.6% の時点に対応する。図-18 にひび割れ発生前の内圧分布および変形図を示すが、腐食膨張圧によって、かぶり面側が押し出されるような変形挙動を示していることから、このような進展挙動になると考えられる。

その後、横方向ひび割れが発生する 2 次勾配は、実験では写真-1 に示す質量減少率 10.0% の時点に対応する。軸方向ひび割れの発生により、かぶり面側の内圧が低下することで勾配が緩やかになるものの、横方向ひび割れの進展とともにかぶり表面を押し広げるような変形をしていると考えられる。また、横方向ひび割れ幅を見ると鉄筋位置に近いほど大きくなっていることが確認でき、ここからも鉄筋位置から横方向ひび割れが進展していることが分かる。

3 次勾配に移る前に横方向へのひび割れ進展長さは飽和している。ここで、ひび割れ進展長さには実験との差異が見られ、表面ひび割れ幅の変化と同様に今後更なる検討が必要であると考えられる。3 次勾配は、実験では写真-1 に示す質量減少率 19.3% の時点に対応する。3 次勾配に移ると鉄筋付近で横方向のひび割れ幅が大きく開いていることと、かぶり表面と鉄筋近傍の軸方向ひび割れ幅の差の増加量が、より大きくなっていることから、横方向ひび割れの進展先を軸にして、かぶり面側への曲げ変形挙動が卓越しているものと考えられる。

(3) 横方向ひび割れによる影響

横方向に生じるひび割れが表面ひび割れの拡大挙動に及ぼす影響について検討を行った。図-19 に示すように軸方向ひび割れが生じる領域以外の引張強度を極端に大きくすることで、横方向ひび割れが生じないケースを仮定して解析を行った。変形図を図-19 に示しているが、かぶり面側が押し広げられるような挙動を示してお

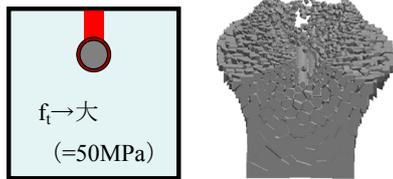


図-19 横方向ひび割れが生じないケースの条件と変形図 (倍率 300 倍)

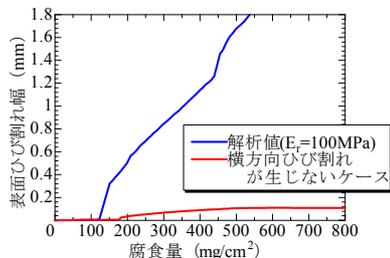


図-20 横方向ひび割れが生じないケースのひび割れ幅変化

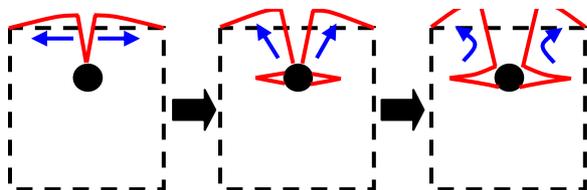


図-21 ひび割れ発生後の変形挙動のイメージ

り、図-20 に示すように通常の解析と比較すると、ひび割れがほとんど開かない結果となった。このことから横方向へのひび割れ進展が表面ひび割れ幅の拡大に大きな影響を及ぼしていることが確認できた。

以上の結果をまとめると、ひび割れ発生後の変形挙動は図-21 に示すように 3 段階に分けられる形になると考えられる。始めに、かぶり面を押し広げるような変形により、かぶり表面から軸方向ひび割れが鉄筋位置に向かって進展する。その後、横方向ひび割れが進展するとともに、かぶり面が押し上げられるような変形挙動を示す。さらに、横方向ひび割れの進展が飽和すると、横方向ひび割れの進展した先を軸にして、かぶり面側に向かって曲げ変形挙動が卓越すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、電食実験および 3 次元 RBSM を用いた腐食膨張によるひび割れ進展解析を行い、表面ひび割れ幅の拡大挙動および内部ひび割れの進展挙動のメカニズムについて検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 電食実験より腐食量と表面ひび割れ幅の関係について検証し、ひび割れ発生後、表面ひび割れ幅の拡大する勾配が 3 段階に分けられることが示された。
- (2) 解析より表面ひび割れ幅の拡大する勾配の変化を定量的に評価できた。しかし、表面ひび割れ幅の拡大する勾配および横方向ひび割れの進展長さにつ

いて実験値を定量的に評価することはできず、今後更なる検討が必要である。

- (3) 実験、解析の両面から軸方向ひび割れはかぶり面側から生じ、鉄筋位置に向かって進展していき、その後、横方向ひび割れが進展していくことが示された。また、横方向ひび割れが進展すると、かぶり面側への曲げ変形挙動が卓越すると考えられる。
- (4) 解析より横方向ひび割れは、表面ひび割れ幅の拡大挙動に大きな影響を及ぼし、その進展挙動を適切に評価することの必要性が示された。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (基盤研究(C), 課題番号: 20560432) により行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.159-166, 1996
- 2) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol10, No2, pp.505-510, 1988
- 3) 元路寛, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001
- 4) 松尾豊史, 西内達雄, 松村卓郎: 鉄筋の腐食膨張に伴うひび割れ進展解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol19, No2, pp.99-104, 1997
- 5) Kawai, T.: New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engineering and Design, Vol.48, pp.207-229, 1978
- 6) Bolander, J. and Saito, S.: Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998
- 7) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008
- 8) Saito, S.: Fracture analyses of structural concrete using spring network with random geometry, Doctoral thesis, Kyushu University, 1999
- 9) 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 腐食ひび割れ進展解析における鉄筋腐食膨張モデルに関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 8 巻, pp.285-292, 2008